



TITLE:

Effect of Microstructural Parameters on
Mechanical Properties and Fracture in $\alpha+\beta$
Titanium Alloy(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Yi, Jangho

CITATION:

Yi, Jangho. Effect of Microstructural Parameters on Mechanical Properties and Fracture in $\alpha+\beta$ Titanium Alloy. 京都大学, 2019, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2019-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22066>

RIGHT:

許諾条件により本文は2021-09-25に公開; 学位規則第9条第2項により要約公開

京都大学	博士（工学）	氏名	李 長昊
論文題目	Effect of Microstructural Parameters on Mechanical Properties and Fracture in $\alpha + \beta$ Titanium Alloy ($\alpha + \beta$ 型チタン合金の機械的性質と破壊に及ぼす微視組織の影響)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、典型的な $\alpha + \beta$ 型チタン合金である Ti-6Al-4V (mass%)合金を題材に、種々の加工熱処理による $\alpha + \beta$ 型チタン合金中の微細組織の形成過程を系統的に調査し、組織形成機構を明らかにするとともに、種々のミクロ組織を有する同合金の引張変形・破壊挙動を調査・議論した実験研究成果を取りまとめたものであり、6章から成っている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景と目的を示している。チタン合金は、軽量でありながら高い強度を示し、また耐熱性や耐食性を併せ持つため、航空機材料、生体材料、化学・海洋プラント材料などとして幅広く応用されている。純チタンは同素変態を起こし、高温では体心立方（BCC）構造を有する β 相が、882℃以下の低温では最密六方（HCP）構造を有する α 相が安定である。チタンに V, Nb, Mo などの β 安定化合金元素を添加すると、β 相が低温でも材料組織中に存在するようになる。室温近傍で α 相と β 相の二相が安定な $\alpha + \beta$ 型チタン合金は、優れた強度-延性バランスを示し、鍛造・圧延加工性に優れるといった長所から、幅広く用いられている。$\alpha + \beta$ 型チタン合金の組織は、特に二相域での加工熱処理を通じて様々な様相を示し、それに応じて機械的性質が変化する。本研究は、最も汎用的に用いられている $\alpha + \beta$ 型チタン合金である Ti-6Al-4V 合金を用いて、種々の条件下における熱間加工と熱処理を加工熱処理物理シミュレータによって付与し、組織形成とそれに伴う力学特性の変化を系統的に明らかにすることを目的としている。$\alpha + \beta$ 型チタン合金における種々のミクロ組織のうち、ラメラ組織とバイラメラ組織と呼ばれる2種類の組織に特に焦点を絞り、両組織においてコロニーと呼ばれる組織単位の微細化を試みて、得られた試料の室温力学特性に及ぼすコロニーサイズの影響を明らかにしようとするものである。</p> <p>第2章では、ラメラ組織およびバイラメラ組織を題材に、種々の条件下での加工熱処理によるラメラ・コロニーの微細化を試みて、57.5 μm から 234 μm の範囲の平均コロニーサイズの試料を得ることに成功している。まず β-transus 温度以上の β 単相領域での熱間圧縮試験を行い、圧縮ひずみの増加とともに最終コロニー組織におけるコロニーサイズが微細化することを明らかにした。しかしここで得られる最小コロニーサイズが最小で 128.7μm であったことから、β-transus 温度以下の $\alpha + \beta$ 二相域で第一段の加工を行い、しかるのちに β-transus 温度以上の温度に昇温して第二段の加工を施す多段加工プロセスを考案した。そしてこの多段加工プロセスによりコロニーサイズを 57.5 μm まで微細化することに成功した。試料の組織と結晶学的特徴を SEM および EBSD により解析し、コロニー微細化の原理を明らかにしている。</p> <p>第3章では、前章で得られた種々のコロニーサイズのラメラ組織およびバイラメラ組織の室温力学特性を引張試験により測定し、強度・延性とミクロ組織の関係を明らかにしている。バイラメラ組織において、微細な二次 α プレートから成る旧 β 領域の方が、粗大な一次 α 領域よりも硬度（強</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	李 長昊
<p>度)が高いことを初めて明確にした。またラメラ組織の強度はコロニーサイズの微細化とともに徐々に増加するが、引張延性はコロニーサイズの影響をあまり受けないこと、一方バイラメラ組織はラメラ組織よりも高い強度を示すこと、コロニーサイズの微細化によって強度はあまり変化しないが引張延性が大幅に増大することを初めて明らかにした。ラメラ組織の強度変化をもとに、コロニーが転位の平均すべり長さを規定しており、そのためにコロニーサイズの微細化とともに強度が増大したものであると論考した。バイラメラ組織の強度がラメラ組織よりも顕著に高いことも、こうした転位のすべり長さとの組織の関係により理解できた。一方、引張延性に関しては、破壊挙動と組織の関係が重要な役割を担っているものと結論づけ、次章で検討することとした。</p> <p>第4章では、前章で試験したラメラおよびバイラメラ組織試料の室温引張変形時の破壊挙動を調査している。ミクロクラックを発生場所の組織の特徴から4種類に分類し、ラメラ組織およびバイラメラ組織における各タイプのミクロクラックの発生頻度を統計的に調査した。その結果、ラメラ組織とバイラメラ組織とではクラックの発生場所と伝播の様相が異なることが明らかとなり、コロニー微細化の影響も異なることを見出した。具体的には、いずれの組織の場合にもクラックの発生は主にラメラ間の境界で生じるが、ラメラ組織の場合にはクラックがコロニー内のラメラを横断して大きく伝播するのに対し、バイラメラ組織の場合にはクラックがラメラを横断することなく、ラメラと旧β領域の境界に沿って成長することを明らかにした。またバイラメラ組織ではコロニー境界がクラック伝播の抵抗となり、クラックが屈曲することを見出した。バイラメラ組織の場合にコロニー微細化によって引張延性が増大した結果は、こうしたミクロ組織との関係により理解することができた。</p> <p>第5章では、異なるコロニーサイズを有するラメラ組織およびバイラメラ組織試料の破壊靱性値を三点曲げ試験により測定している。三点曲げ試験時の荷重-変位曲線からJ積分によって靱性を評価し、第4章で見出した破壊挙動、および第3章で見出した引張延性とコロニーサイズとの関係との良い対応を確認している。</p> <p>第6章は総括であり、本研究で得られた結果を要約しまとめている。</p>			

氏 名	李 長昊
-----	------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、典型的な $\alpha + \beta$ 型チタン合金である Ti-6Al-4V (mass%)合金を用いて、種々の条件下における熱間加工と熱処理を加工熱処理物理シミュレータにより実施し、高温加工熱処理によるマイクロ組織、特にラメラ組織とバイラメラ組織におけるコロニーサイズの微細化の可能性を調べ、さらに得られた試料の室温力学試験を行って、力学特性に及ぼす組織パラメータの影響を調査・議論した実験研究の結果を取りまとめたものである。得られた主な成果は次の通りである。

1. Ti-6Al-4V 合金試料に対して β -transus 温度以上の β 単相領域での熱間圧縮試験を行い、圧縮ひずみの増加とともに最終ラメラ組織におけるコロニーサイズが微細化することを明らかにした。さらに β -transus 温度以下の $\alpha + \beta$ 二相域で第一段の加工を行ったのちに β -transus 温度以上の温度に昇温して第二段の加工を施す多段加工プロセスを考案し、コロニーサイズを $57.5 \mu\text{m}$ まで微細化することに成功した。詳細な組織・結晶学解析により、コロニーサイズの微細化には、粒界 α 相の制御が重要であることを明らかにし、上記の加工熱処理によって β 相の微細化や、 β 粒界の屈曲が生じることで、粒界 α 相が微細化され、最終的なコロニー微細化が達成されることを明らかにした。

2. 種々のコロニーサイズのラメラ組織およびバイラメラ組織の室温力学特性を引張試験により測定し、強度・延性とマイクロ組織の関係を明らかにした。バイラメラ組織において、微細な二次 α プレートから成る旧 β 領域の方が粗大な一次 α 領域よりも硬度（強度）が高いことを初めて明確にした。ラメラ組織とバイラメラ組織とでは、コロニーサイズの微細化が強度あるいは延性に及ぼす影響が大きく異なることを見出した。ラメラ組織の強度はコロニーサイズの微細化とともに徐々に増加し、これはコロニーが転位の平均すべり長さを規定しているためであり、またそのためにバイラメラ組織の強度がラメラ組織よりも顕著に高くなることを明らかにした。

3. ラメラおよびバイラメラ組織試料の室温引張変形時の破壊挙動を調査している。ミクロクラックを発生場所の組織の特徴から4種類に分類し、ラメラ組織およびバイラメラ組織における各種類のミクロクラックの発生頻度を統計的に調査した。いずれの組織の場合にもクラックの発生は主にラメラ間の境界で生じるが、ラメラ組織の場合にはクラックがコロニー内のラメラを横断して大きく伝播するのに対し、バイラメラ組織の場合にはクラックがラメラを横断することではなく、ラメラと旧 β 領域の境界に沿って成長すること、またバイラメラ組織ではコロニー境界がクラック伝播の抵抗となり、クラックが屈曲することを見出した。バイラメラ組織の場合にコロニー微細化によって引張延性が増大した結果を、こうしたマイクロ組織との関係により説明した。

以上の成果をまとめた本論文は、実用的にも重要な $\alpha + \beta$ 型チタン合金において、加工熱処理によるコロニー微細化の可能性を示すとともに、ラメラ組織およびバイラメラ組織の室温力学特性に及ぼすコロニーサイズの影響を調査した上で、その原因をマイクロ組織との関係により解明したものであって、学術上および将来の実用上も寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和元年8月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、（令和3年9月25日までの間）当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日：令和元年9月24日以降

